

**А. В. Еремин\*, Л. М. Железняк**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

\**Funk1.ghetto@gmail.com*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ ПОЛУЧЕНИЯ НИКЕЛЕВОЙ ПРОВОЛОКИ ПОЛУТВЕРДОГО СОСТОЯНИЯ

В лабораторных и производственных условиях исследованы три технологические схемы получения полутвердой никелевой проволоки. Обоснованы термические и деформационные режимы обработки промежуточных заготовок и готовой проволоки, обеспечивающие выпуск промышленных партий проволоки с механическими свойствами, удовлетворяющими требованиям заказчика.

*Ключевые слова:* никелевая проволока, зарубежный заказчик, полутвердое состояние, лабораторно-производственное исследование, промышленные партии.

**A. V. Eremin, L. M. Zheleznyak**

## INVESTIGATION OF PROBLEM OF OBTAINING NICKEL WIRE SEMI-SOLID STATE

There are investigated three technological schemes of receiving semisolid nickel wire. In laboratory and industrial conditions were justified thermal and deformation modes of treatment of intermediate billets and finished wire providing output of industrial batches of wire with mechanical properties which meets the requirements of customer.

*Keywords:* nickel wire, foreign customer, semisolid state, laboratory and production research, industrial batches.

Согласно ГОСТ 2179-75 проволока из никеля марки НП2 (никель промышленный) выпускается в твердом ( $\sigma_b = 690\text{--}880$  МПа,  $\delta$  не регламентировано) и мягком ( $\sigma_b \leq 370$  МПа,  $\delta \geq 26$  %) состояниях. Зарубежный партнер заказал никелевую проволоку отсутствующего в стандарте РФ полутвердого состояния ( $\sigma_b = 490\text{--}600$  МПа,  $\delta > 15$  %), диаметрами, мм: 2,5; 3,25; 4,0; 5,0; 6,0; проволока должна иметь матовую поверхность. Литературный поиск показал, что информация о технологических режимах производства проволоки с требуемыми механическими свойствами отсутствует, поэтому поставленную задачу решали проведением исследования в производственных условиях.

Никель с ростом относительного обжатия  $\varepsilon$  интенсивно упрочняется почти по линейной зависимости, при этом  $\delta$  существенно снижается и для требуемого интервала  $\sigma_b = 490\text{--}600$  МПа составляет  $\delta = 5\text{--}12\%$ , что намного ниже установленного значения  $\delta > 15\%$ . Поиск регламента обработки с целью получения проволоки полутвердого состояния

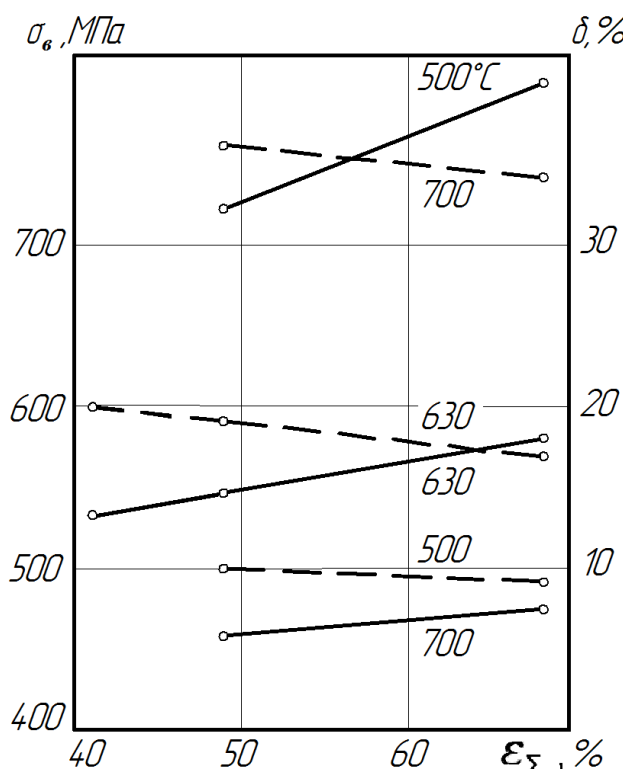


Рис. 1. Зависимость механических свойств проволоки от температуры неполного отделочного отжига и суммарного относительного обжатия до отжига (схема №1)

проводили, исследуя три технологические схемы: 1) с неполным по температуре  $t$  и времени выдержки  $\tau$  отделочным отжигом; 2) с отделочным волочением проволоки после неполного предотделочного отжига; 3) с отделочным волочением после полного предотделочного отжига.

В соответствии с первой схемой проволоку безокислительно отжигали в конвейерной печи с водяными затворами. Согласно второй схеме заготовку после неполного отжига в шахтной печи охлаждали в муфеле. При третьей схеме после полного предчистового отжига заготовку охлаждали вместе с печью. Использовали заводскую катанку диам. 7,2 мм. При исследовании применяли метод математического планирования эксперимента.

Таблица 1

Механические свойства проволоки диам. 3,25 мм после обработки по схеме №1

Параметры неполного отделочного отжига			Суммарное относительное обжатие до отжига, %	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
Вид	Температура, °C	Продолжительность выдержки, ч			
Неполный отделочный	500	1,5	49/68	727/790*	9/9
		2,5		730/782	9/10
	700	1,5		462/470	36/36
		2,5		463/475	33/36

\* Сведения для  $\sigma_b$  и  $\delta$  в числителе соответствуют  $\varepsilon = 49\%$ , в знаменателе  $\varepsilon = 68\%$

Операции получения проволоки диам. 3,25 мм согласно схеме №1: волочение катанки — полный отжиг ( $t = 800\text{ °C}$ ,  $\tau = 3\text{ ч}$ ) — волочение

проволоки – неполный отделочный отжиг на полутвердое состояние (табл. 1); опробовали два маршрута волочения с полным отжигом заготовок на диам. 5,74 или 4,54 мм. После неполного отжига проволоки, протянутой с относительным обжатием  $\varepsilon_{\Sigma}$  по схеме №1 (табл. 1 и рис. 1)

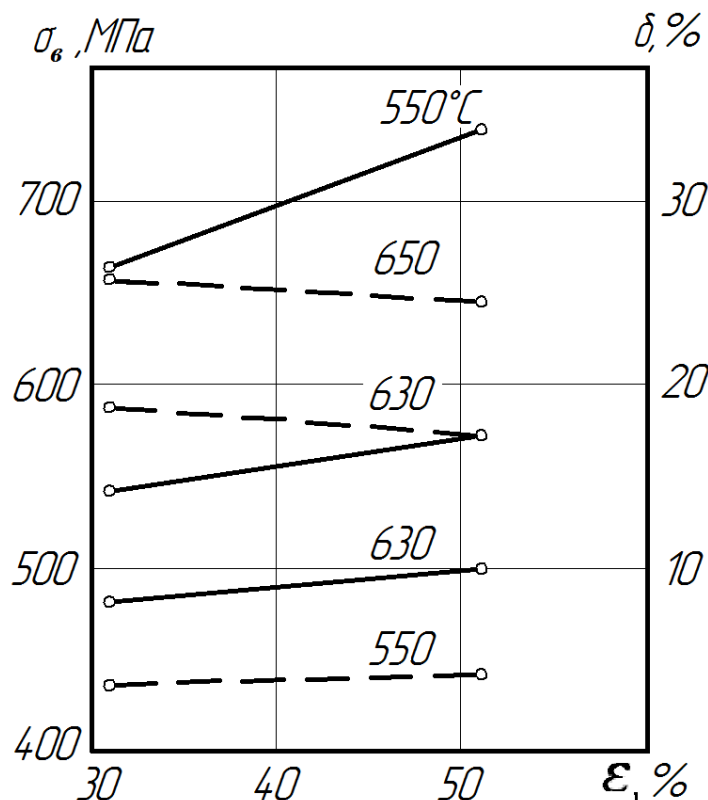


Рис. 2. Зависимость механических свойств проволоки от температуры неполного предотделочного отжига и относительного обжатия до отжига (схема №2)

$\tau = 2$  ч), протянутой с  $\varepsilon_{\Sigma} = 41\text{--}46$  %. Механические свойства после такой обработки не отвечали условиям заказа, поскольку при точности соблюдения в действующем производстве параметров отжига достижение требуемых свойств не гарантировано.

установили, что более глубоко отожженный металл ( $t = 700$  °C) имеет, разумеется, пониженное  $\sigma_{\text{в}}$  и повышенное  $\delta$ .

Вместе с тем влияние  $\varepsilon_{\Sigma}$  при отделочной деформации (49 и 68 %) на свойства проволоки после отжига при  $t = 700$  °C и  $\tau = 1,5$  ч подавлено:  $\sigma_{\text{в}}$  возрастает слабо (с 462 до 470 МПа),  $\delta$  не изменилось. Отжиг при  $t = 500$  °C и  $\tau = 1,5$  ч приводит к росту  $\sigma_{\text{в}}$  (с 727 до 790 МПа),  $\delta$  удерживается на уровне 9–10 %. Влияние  $\tau$  при температурах неполного отделочного отжига малозначимо, ее можно принять равной 2 ч. Дополнительно испытывали режим неполного отделочного отжига проволоки ( $t = 630$  °C,

Таблица 2  
Механические свойства проволоки диам. 3,25 мм после обработки по схеме №2

Параметры неполного отделочного отжига			Относительное обжатие до отжига, %	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
Вид	Температура, °C	Продолжительность выдержки, ч			
Неполный предотделочный	550	2,0	31/51	657/736*	3,5/4
	650			477/486	25/24

\* Сведения для  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\delta$  в числителе соответствуют  $\varepsilon = 31$  %, в знаменателе  $\varepsilon = 51$  %

При исследовании схемы №2 (с неполным предотделочным отжигом) отделочное волочение проволоки диам. 3,25 мм проводили с  $\varepsilon = 8\%$ , с полным отжигом заготовок ( $t = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 3\text{ ч}$ , охлаждение с печью) на диаметрах 4,01 или 4,75 мм и с неполным отжигом ( $t = 550, 630, 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ ч}$ , охлаждение в муфеле) на диам. 3,34 мм. Свойства проволоки, полученной по схеме №2 (табл. 2 и рис. 2), нестабильны вследствие отклонений параметров отжига в реальном производстве (даже при наибольшей температуре неполного отжига, равной  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Таблица 3

Механические свойства заготовки и готовой проволоки при обработке по схеме №3

Диаметр, мм		Относительное обжатие при отделочной деформации, %	Механические свойства			
заготовки	проволоки		заготовки		проволоки	
			σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %
4,01	3,87	6,9	456	39	505	26
4,75	4,53	9,0	453	39	499	29

В отличие от других схема №3 содержит полный отжиг предчистовой заготовки (подтяжки); при этом промежуточные отжиги можно исключить, если позволяют пластические свойства металла. На этом этапе полный отжиг проводили по режиму:  $t = 750 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 3 \pm 0,5\text{ ч}$ , охлаждение с печью (табл. 3). Результаты расширенной производственной проверки экспериментально отработанных режимов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Механические свойства заготовок и готовой проволоки по результатам расширенной проверки в производственных условиях

Диаметр, мм		Относительное обжатие при отделочной деформации, %	Механические свойства					
заготовок	проволоки		твердой заготовки		мягкой заготовки		готовой проволоки	
			$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %
2,78	2,64	9,8	947	2,5	489	32	562	18,0
3,54	3,34	10,9	917	3,0	491	32	567	17,0
4,24	3,99	11,4	863	4,5	495	37	571	18,0
5,21	4,96	9,4	814	5,0	493	36	525	21,5
6,45	6,00	13,5	657	6,5	461	42	549	21,0

Установлено, что механические свойства проволоки с использованием полного предотделочного отжига согласно схеме №3 существенно зависят от  $\varepsilon$  при чистовом волочении, несмотря на то, что

значения  $\varepsilon$  изменяли не столь существенно: 6,9–9 % (в лаборатории), 9,8–13,5 % (в цехе). Таким образом, свойства никелевой проволоки, обработанной по схеме №3, полностью соответствуют требованиям заказа. Исследования подтвердили стабильность в условиях производства влияния деформационных режимов в сравнении с режимами термообработки.

Дополнительные достоинства принятой схемы №3 приведены ниже:

- экономическая эффективность, поскольку появляется возможность ликвидировать промежуточные отжиги, в особенности для проволоки диаметром  $\geq 4$  мм, что вполне достижимо с учетом высокой пластичности никеля;
- надежная реализация деформационных и термических режимов на действующих в производстве оборудовании и агрегатах.

Заключение. На основе результатов лабораторного и производственного исследования организован выпуск промышленных партий проволоки из никеля марки НП2 полутвердого состояния. Проволока полностью удовлетворяет требованиям зарубежного заказчика по механическим свойствам и качеству поверхности.